서울시립대학교 도시과학연구원
도시과학논총 제28권 2002년 12월
The Journal of Urban Sciences
The University of Seoul
Vol. 28, No. 1, December 2002.

초기전단응력이 액상화강도에 미치는 영향 분석

이 송 · 윤 광 현
(서울시립대학교 토목공학과 지반공학연구실)

An analysis for effects of initial stress on resistance of liquefaction

Lee, Song · Yoon, Kwang Hyun

Abstract

The purpose of this study is to examine closely effect of initial shear stress on resistance to liquefaction and cyclic loading behaviour characteristic of sand considering stress state of field.

Static triaxial tests were performed under test condition as cyclic triaxial tests to better understand mechanism of cyclic shear behaviour. Soils for test are chosen on alluvial sandy soil picked in the lower Han river. Specimens remoulded by all initial relative density 35% to analyze in priority about behaviour of loose sand that liquefaction potential is high and tests were performed to investigate effect of initial shear stress according all sorts condition of test except consolidation stress ratio. Additionally static triaxial tests were performed under test condition as cyclic triaxial tests to better understand mechanism of cyclic shear behaviour.

As tests result liquefaction resistance strength by initial shear stress showed tendency that decrease after increase on the whole. Specially In the case of stress no reversal, according as axial strain that get into standard of liquefaction strength decreased, liquefaction resistance strength decreased remarkably. Therefore, liquefaction resistance strength should not be defined by number of cycles that initial liquefaction phenomenon triggers or pore water pressure converges but by number of cycles that specific axial strain is generated.

Keywords : Liquefaction, Initial shear stress, Critical effective stress ratio, Stress reversal, Stress no reversal, Cyclic strain, Residual strain

1. 서론

지반의 액상화 가능성은 일반적으로 등방압밀시료에 대한 비배수 반복삼축시험 또는 일차원 압밀시료에 대한 반복단순전단시험으로 평가한다. 하지만 실제적으로 자연 상태의 지반이 퇴적할 때 흙 입자는 불규칙하게 배열되며 오랜 퇴적시간을 걸쳐 흙 입자는 대체로 연직응력에 대하여 직각방향으로 배열되어 초기전단응력이 존재하게 되는 이방성을 띠게 된다. 특히, 제방이나 사면, 댐 등과 같은 지역의 수평평면에서의 이방성은 더욱 뚜렷하다. 이러한 초기전단응력에 따라 지진하중에 의한 흙의 거동과 강도특성이 달라진다. 예를 들어 같은 지진하중을 받는 경우에도 대상지역의 초기전단응력에 따라 유동 액상화 또는 Cyclic mobility가 발생하게 된다.

이와 같이 포화된 지반이 지진이나 열차하중, 파일 항타, 폭파 등의 진동을 받게 되는 경우 지반은 등방압밀상태가 아니며 수평면에 대하여 연직방향으로 초기전단응력을 받고 있는 이방압밀상태에 있다. 다시 말해서 어느 특정한 지반이 지진이나 진동을 받게 되는 경우, 지반은 초기전단응력을 받고 있는 상태에서 추가적인 반복전단응력을 받게 되는 것이다. 이 때 지반의 초기전단응력 크기의 정도에 따라 반복하중 재하에 따른 간극수압 및 파괴 양상이 변화하며 액상화 저항도 달라지게 된다.

본 연구에서는 현장의 응력 상태를 고려하여 초기전단응력의 변화에 따른 지반의 반복전단거동의 특성 및 액상화 저항에 대하여 규명하고 지진구조물 설계시 이방성을 고려한 액상화 저항강도의 적용의 필요성을 제시하는데 그 목적이 있다.

이를 위하여 한강 하류에서 채취한 충적 사질토에 대하여 초기상대밀도 약 35%의 느슨한 시료를 이방 압밀시켜 초기전단응력을 달리한 조건에서 비배수 응력 제어 반복삼축시험과 변형률 제어 정적삼축시험을 실시하였다.

2. 이론적 고찰

2.1 액상화의 발생

어떤 지반이 액상화 가능성이 있다고 해서 주어진 지진하중에 의하여 반드시 액상화가 일어나지는 않는다. 액상화가 발생하기 위해서는 충분히 강한 교란이 필요하다. 교란 특성에 관한 평가는 액상화 가능성 평가의 가장 중요한 부분 중의 하나이다.

액상화 발생에 대한 이해를 하기 위해서는 액상화가 시작될 때의 흙의 응력상태에 대한 이해가 필요하다.

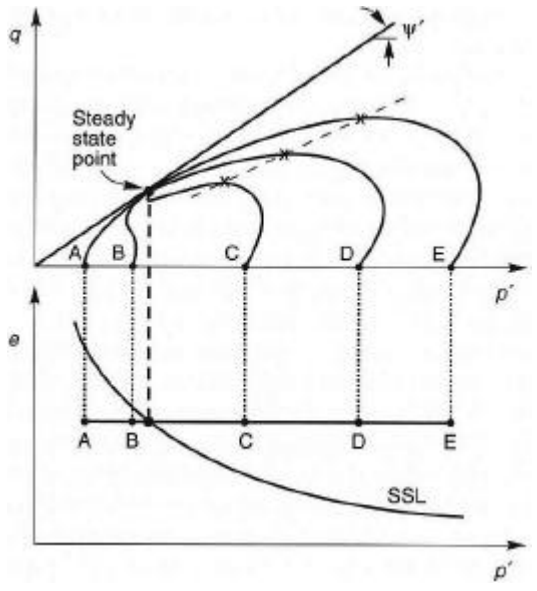
1) 한계유효응력비

유동 액상화가 발생하는 조건은 유효응력 경로를 통하여 쉽게 나타낼 수 있다. <Fig. 2-1>의 시료 A와 B의 초기상태는 정상상태선 아래에 있기 때문에 전단동안에 팽창거동을 나타낸다. 반면에 시료 C, D, E는 수축거동을 나타내며 첨두 비배수 강도에 도달한 후에는 빠르게 정상상태까지 변형한다. 그리고 <Fig. 2-1>상의 x표시된 지점에서 첨두강도에 도달한 직후 유동액상화가 발생하게 된다. [7)12)]

1979년 *Hanzawa et al*과 1983년 *Vaid & Chern*, 그리고 최근의 연구자들은 유동액상

화가 발생하는 유효응력조건을 나타내는 점들의 궤적이 응력경로의 원점을 지나는 직선임을 보여주었다. 도식적으로 이러한 점들은 응력경로상에서 한계유효응력비선, CSRL이라 한다.[7)12)]

CSR은 비배수 전단시 안정과 불안정 상태 사이의 경계를 구분 짓는다. 흙 요소의 응력상태가 정적이든 동적이든 간에 비배수 조건에서 CSR에 도달하게 되면 유동액상화는 시작되고 전단저항은 정상상태강도까지 감소된다. 그러므로 CSR은 유동액상화를 일으키는 조건으로 설명할 수 있다.[7)12)]



<Fig. 2-1> 다른 구속압에서 동일한 간극비로 등방압밀된 시료의 거동

2) 정적 거동과 반복 거동의 일치성

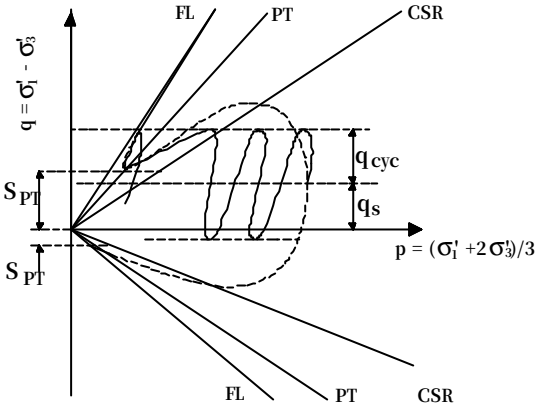
1994년 Hyodo *et al.*은 반복과 정적 삼축시험의 일치성을 다양한 초기전단응력 하에서 반복과 정적시험으로부터 얻은 결과값을 겹쳐 나타냄으로써 조사하였다.[8)]

<Fig. 2-2(a)>는 반복과 정적전단시험의 유효응력 경로를 나타낸 것이다. 실선은 반복시험의 응력경로이며 점선은 정적시험의 응력 경로이다. <Fig. 2-2(a)>는 압축 측의 CSR에 닿아 파괴에 이르는 경우이며 <Fig. 2-2(b)>는 인장 측의 CSR에 닿아 파괴에 이르는 경우이다.[8)]

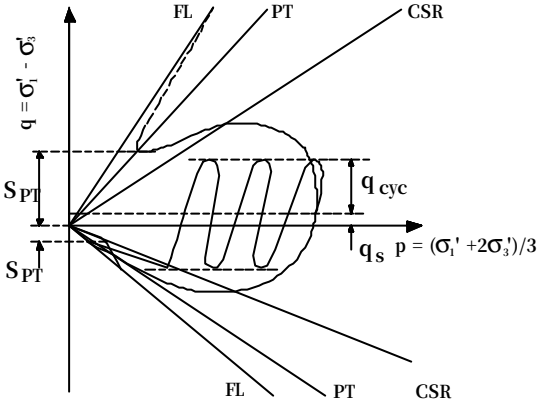
<Fig. 2-2(a)>에서 시료는 초기에 비배수 상태에서 만큼 정적하중을 받는 상태이다. 반복하중이 가해짐에 따라 간극수압은 증가하게 되고 유효응력경로는 왼쪽을 향하여 움직이게 된다. 전단 저항은 응력경로 상에서 CSR에 도달하였을 때 시료는 불안정해지고 상전이점까지 빠르게 변형한다.[8)]

이 현상은 느슨한 모래에서의 전형적인 거동 특성이며 1983년 *Vaid & Chern*은 이 현상을 Flow Deformation, 유동변형이라 하였다. 반복전단응력의 비역전과 역전의 일부 경우에 유효응력 경로는 그림에서와 같이 압축 측의 CSR에 도달하여 압축 측의 상전이점까지 이동한 후 파괴 선을 넘나들며 계속하여 점진적으로 변형하게 된다.[12)]

<Fig. 2-2(b)>는 응력 역전의 대표적인 경우로서 <Fig. 2-2(a)>의 경우와 마찬가지로 전단 저항은 응력경로 상에서 CSR에 도달하였을 때 불안정해지고 상전이점까지 빠르게 변형하는 유동변형이 발생한다. 이 경우에는 인장 측의 CSR에 먼저 닿아 인장 측의 상전이점을 향하여 빠르게 변형하는 특징이 있다.[8)]



(a) 압축 측의 CSR에 닿는 경우



(b) 인장 측의 CSR에 닿는 경우

<Fig. 2-2> 반복시험 동안에 유효응력경로상의 유동변형의 발생

3. 실내 시험

3.1 시험 장치

본 연구에서 사용된 시험기는 C. K. Chan에 의해 개발된 자동화 삼축시험 장치이다. 일반적인 삼축시험 이외에도 Cyclic 시험, Dynamic 시험, Arbitrary stress path 시험, Creep and Relaxation 시험도 가능하다.

3.2 시료 특성

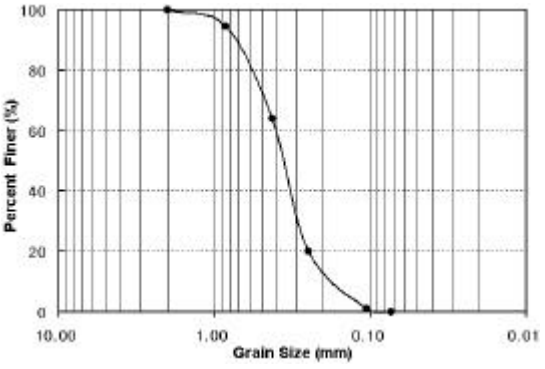
1) 시료의 입도분포 및 물성

본 연구에 사용된 시료는 한강 하류 충적지의 모래를 사용하였으며 No.10체를 모두 통과하고 No. 200체에 모두 남는 직경 0.075mm ~ 2.00mm인 모래를 수세하여 깨끗한 모래로 만들어 사용하였다. 입도분포 시험에 사용된 체는 No.200, No.140, No.60, No.40, No.20, No.10체를 사용하였다. 입도분포곡선은 <Fig. 3-1>에 나타내었다.

상대밀도를 재현하기 위해 최대건조밀도와 최소단위중량을 구하였다. 최대단위중량은 ASTM D 4253에 의하여 건조시킨 시료에 대하여 전자기식 진동 테이블을 이용하여 산정하였고 최소단위중량은 ASTM D 4254에 규정에 따라 건조낙하법을 이용하여 산정하였다. 입도분포시험과 기본물성시험에 의한 한강 모래의 물성치는 다음 <Table. 3-1>과 같다.

<Table. 3-1> 한강 모래의 물성치

G_s	D_{10}	D_{50}	C_u	C_c	γ_{dmax}	γ_{dmin}
2.66	0.175	0.357	2.29	1.21	1.572	1.256



<Fig. 3-1> 한강 모래의 입도분포곡선

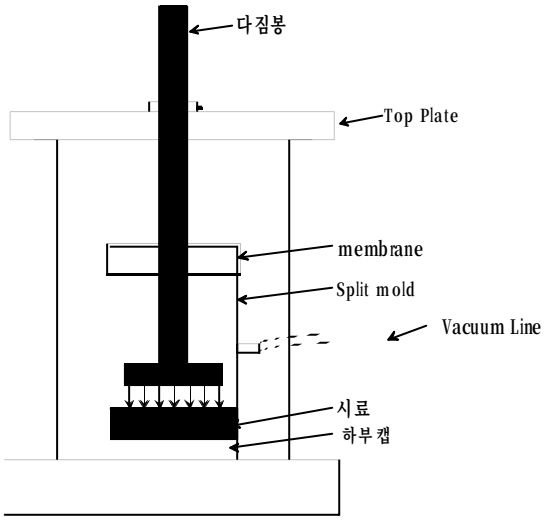
3.3 시험 내용 및 방법

1) 공시체 준비 및 포화

교란된 시료의 시료성형방법에는 수중낙하법, 습윤다짐법, 진동다짐법, 공중낙하법 등의 방법이 있으나 본 연구에서는 <Fig.

3-2>와 같은 시료성형장치를 이용하여 느슨한 상태의 시료 성형에 적합한 Moist Tamping Method, 습윤다짐법을 사용하였다. 이때 시료는 직경 50mm, 높이 100mm로 성형 제작하였다.[10)]

공시체 제작에 있어 가장 중요한 점은 시료를 균질한 밀도로 성형하는 것이다. 만약 시료가 균질한 밀도로 성형되지 않는다면 시료에 반복축차응력이 가해질 때 시료의 취약부위에서 파괴가 발생되어 정확한 시험값을 얻기 힘들게 된다. 이러한 이유에 100mm 높이 시료를 5등분하여 각각의 타격회수를 계산하여 균질한 다짐에너지가 가해지도록 하였다.



<Fig. 3-2> 시료성형장치

다음으로 공시체의 포화를 위하여 약 20kpa의 낮은 진공압을 1~2시간 주어 시료 속의 공기를 제거하였고 그 후 셀압과 배압의 차이를 10kpa로 유지하면서 배압을 시료에 무리가 가지 않도록 50kpa씩 서서히 증가시켰다. 이 때 *Skempton*의 B계수가 0.96이 되면 완전 포화된 것으로 간주하고 압밀 단계로 넘어갔다.

2) 압밀

공시체를 현장의 상태로 재현시켜주기 위한 압밀은 크게 이방과 등방상태 두 가지로 실시하였다. 시료는 우선 등방압밀을 시킨 후 평균유효주응력, $p_c' = (\sigma_1' + 2\sigma_3')/3$ 이 100kpa이 될 때까지 원하는 초기전단응력, $t_s = q_s/2 = (\sigma_{1c}' - \sigma_{3c}')/2$를 0, 10, 20, 30, 40으로 가하여 등방 및 이방 압밀을 실시하였다. 이 때 모든 시험에서 평균유효주응력이 100kpa로 일정하게 한 이유는 초기전단응력에 의한 영향을 같은 조건에서 비교분석하기 위함이다.

3) 정적삼축시험

등방과 이방압밀시킨 시료에 대하여 비배수 상태에서 변형률 제어 정적 삼축 압축시험 및 인장시험을 실시하였다. 정적 삼축시험의 조건은 <Table. 3-2>와 같으며 평균유효주응력, p'를 100kPa로 일정하게 유지한 상태에서 다양한 초기전단응력을 가하여 여러 가지 이방 압밀 조건에서 시험을 실시하였다. 정적 축하중은 0.5%/min의 속도로 재하하였다. 초기전단응력은 압축 측에서만 적용하였는데 그 이유는 느슨한 모래의 경우 인장 측에서는 초기전단응력을 적용하기 매우 어렵기 때문이다.

4) 반복삼축시험

반복하중시험은 비배수 전단과정에서 반복재하 하중은 sine파를 사용하였으며 1Hz의 진동수로 가하여 그때의 간극수압과 반복횟수, 축차응력을 파악하였다.

반복삼축시험의 조건은 <Table. 3-3>과 같으며 정적시험에서와 마찬가지로 평균유효주응력, p_c'를 100kPa로 일정하게 유지한 상태에서 다양한 초기정적전단응력, t_s을 가하여 여러 가지 이방 압밀 조건에서 시험을

실시하였다. 반복전단응력, t_{cyc} 의 크기는 반복전단응력의 역전과 비역전상태를 재현시키기 위하여 각각의 초기정적전단응력과 조합되어졌다. 반복응력 역전정도를 보여주는 t_{cyc}/t_s 값을 <Table. 3-3>에 나타내었다.

<Table. 3-2> 정적삼축시험의 조건

τ_s(kPa)	p_c'(kPa)	σ_{3c}'(kPa)	σ_{3c}'(kPa)	$K_c'(=\frac{\sigma_{3c}'}{\sigma_{3c}'})$	e_c	Mode
0	100	100.0	100.0	1.0	0.938	
10	100	113.3	93.3	1.21	0.934	
20	100	126.7	86.7	1.46	0.949	압축
30	100	140	80	1.75	0.941	
40	100	153.3	73.3	2.09	0.939	
0	100	100.0	100.0	1.0	0.940	
10	100	113.3	93.3	1.21	0.942	인장
20	100	126.7	86.7	1.46	0.937	

<Table. 3-3> 반복삼축시험의 조건

τ_s(kPa)	τ_{cyc}(kPa)	σ_{1c}'(kPa)	σ_{3c}'(kPa)	K_c	e_c	τ_{cyc}/τ_s	역전유무
0	18	100.0	100.0	1.00	0.943	-	역전
0	19	100.0	100.0	1.00	0.951	-	역전
0	20	100.0	100.0	1.00	0.952	-	역전
0	23	100.0	100.0	1.00	0.947	-	역전
0	27	100.0	100.0	1.00	0.939	-	역전
10	19	113.3	93.3	1.21	0.951	2.00	역전
10	21	113.3	93.3	1.21	0.942	2.10	역전
10	23	113.3	93.3	1.21	0.944	2.30	역전
10	27	113.3	93.3	1.21	0.934	2.70	역전
10	28	113.3	93.3	1.21	0.940	2.80	역전
20	18	126.7	86.7	1.46	0.938	0.90	비역전
20	19	126.7	86.7	1.46	0.949	0.95	비역전
20	20	126.7	86.7	1.46	0.958	1.00	역전
20	22	126.7	86.7	1.46	0.946	1.10	역전
20	27	126.7	86.7	1.46	0.948	1.35	역전
30	16	140.0	80.0	1.75	0.944	0.53	비역전
30	17	140.0	80.0	1.75	0.941	0.57	비역전
30	18	140.0	80.0	1.75	0.933	0.60	비역전
30	19	140.0	80.0	1.75	0.952	0.63	비역전
30	22	140.0	80.0	1.75	0.942	0.73	비역전
40	16	153.3	73.3	2.09	0.944	0.38	비역전
40	17	153.3	73.3	2.09	0.936	0.43	비역전
40	19	153.3	73.3	2.09	0.941	0.48	비역전
40	24	153.3	73.3	2.09	0.946	0.60	비역전

4. 실내시험결과 및 분석

4.1 정적전단거동특성

<Fig. 4-1>은 비배수 정적삼축압축과 인장시험의 결과로서 유효응력경로를 나타낸 그래프이다. 먼저 압축 측의 유효응력경로를 볼 때 전단의 시작과 함께 시료는 간극수압이 증가하는 수축 거동을 보였다. 이 때 축차응력은 국부적인 첨두축차응력 값인 한계유효응력비에 도달한 후에 변형률 연화현상을 나타내어 감소하였다. 이 선을 통과하면서부터 시료는 축차응력이 감소하면서 불안정 상태에 접어들었다.

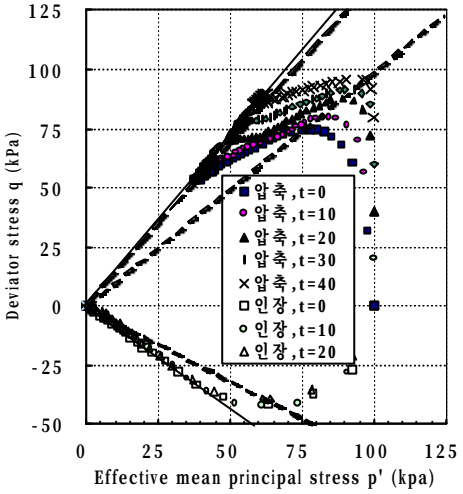
이 후 상전이점을 통과한 시료의 유효응력 경로는 파괴 포락선을 따라 거슬러 올라갔다. 이 팔꿈치 모양으로 꺽이는 곡선은 모든 압축시험에서 나타났다. 그림에서 알 수 있듯이 초기전단응력이 커지면 커질수록 첨두축차응력 값과 상전이강도, S_{PT} 값이 증가하였다. 압축 측의 파괴포락선과 상전이선의 기울기는 압밀응력비, K_c' 에 상관없이 각각 1.43과 1.421로 측정되었고 한계유효응력비선, CSRL은 0.98로 측정되었다.

인장 측에서는 서로 다른 초기전단응력점에서 시작한 응력경로는 같은 경로를 따라 움직였으며 정상상태강도, S_{SU} 에 도달하였을 때 유효응력은 거의 0이었다. 모든 비배수 삼축인장시험에서 느슨한 시료에서 나타나는 정적 액상화가 일어났다. 또한 압축 측과 마찬가지로 인장 측의 파괴 포락선과 한계유효응력비선의 기울기는 압밀응력비, K_c' 에 독립적으로 각각 -0.91, -0.65로 측정되었다.

<Table. 4-1>에 정적시험의 파괴선, 상전이선, 한계유효응력비선의 기울기와 첨두강도 및 그 때의 변형률, 상전이강도 및 그 때의 변형률를 나타내었다.

<Table. 4-1> 첨두강도, 상전이강도 및 CSRL, PTL, FL의 기울기

	τ_s (kPa)	K_c' (kPa)	q_{peak} (kPa)	ε_{peak} (%)	S_{PT} (kPa)	ε_{PT} (%)	CSRL	PTL	FL
압축	0	1.0	75.1	2.1	53.0	10.5	0.98	1.42	1.43
	10	1.21	80.3	1.8	56.4	10.2			
	20	1.46	87.6	1.2	60.5	9.3			
	30	1.75	91.5	1.2	62.9	9			
	40	2.09	95.8	0.9	65.9	8.4			
인장	0	1.0	-41.2	-0.9	-	-	-0.65	-	-0.91
	10	1.21	-42.1	-0.9	-	-			
	20	1.46	-39.2	-0.9	-	-			



<Fig. 4-1> 정적시험의 유효응력경로

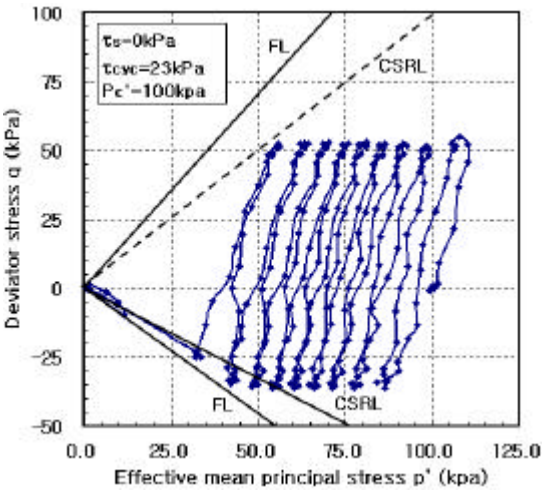
4.2 반복전단거동특성

1) 유효응력경로

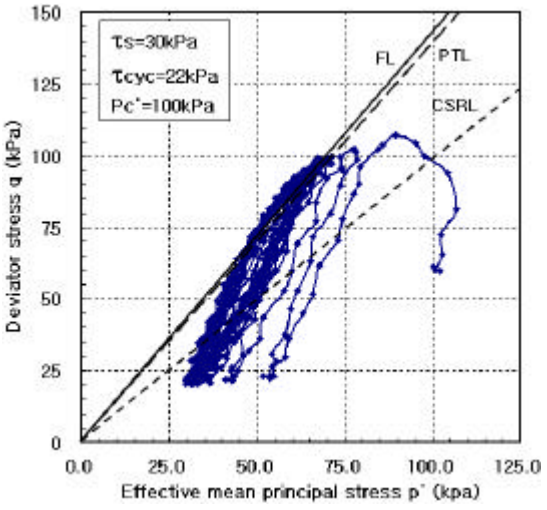
<Fig. 4-2>의 각각의 응력경로는 정적 시험으로부터 얻은 파괴선에 점점 가까워짐을 알 수 있다. <Fig. 4-2(a)>는 응력 역전 상태를 대표하는 유효응력경로이다. 이 그래프에서 응력경로는 반복재하가 시작되면서 점점 유효응력이 감소하여 왼쪽으로 이동하다가 인장 측의 CSR선에 도달 한 후에 인장 측의 파괴선으로 갑작스럽게 이동하는 유동변형 현상을 나타내었다. 그리고 나서 곧바로 유효응력 0인 지점을 통과하는 초기 액상화 현상이 일어났다.

거의 모든 응력 역전의 경우에서 시료는 인장하는 경향을 띠었다. 그리고 인장 측의 폭이 압축 측의 폭보다 작은 경우까지 포함하여 전체적인 경향에 있어 압축 측보다는 인장 측에서 파괴선에 더 가까이 있음을 관찰 할 수 있었다. 그 이유는 정적 시험의 결과에서 알 수 있듯이 파괴 포락선의 기울기의 절대 값이 인장 측이 압축 측보다 작기 때문에 그러하리라 추측된다.

<Fig. 4-2(b)>는 응력 비역전 상태를 대표하는 유효응력경로이다. 그림에서 볼 수 있듯이 반복재하 초기에 CSR선에 도달한 후 파괴선을 향하여 급진적으로 이동하는 유동변형을 발견할 수 있다. 이러한 큰 이동 후에 응력경로는 안정화되었고 파괴선 가까이에서 정상상태 폐곡선을 그리고 있다. 이는 더 이상의 간극수압의 증가가 발생하지 않음을 뜻하며 응력 역전 상태와 대비적으로 비역전인 경우에는 유효응력이 0에 도달하는 초기 액상화 현상은 발생하지 않았다.



(a) Reversal



(b) No-Reversal

<Fig. 4-2> 전형적인 역전과 비역전상태의 유효응력경로

2) 과잉간극수압 및 축변형률의 발달

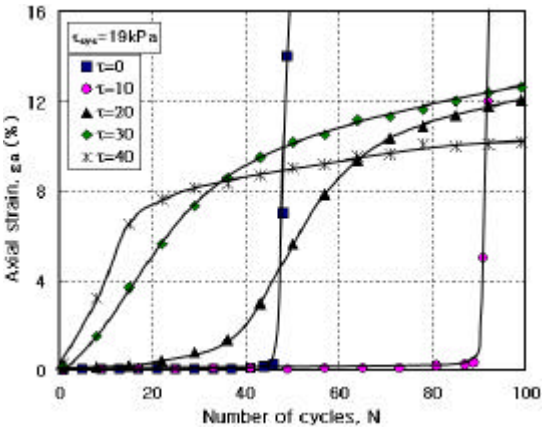
<Fig. 4-3>은 동일한 반복하중인 $t_{cyc}=19kPa$ 를 가한 상태에서 초기전단응력의 변화에 따른 반복횟수와 축변형률의 관계이다. 이 때 축변형률은 응력 역전의 경우에는 양진폭 변형률로 측정하였으며 응력 비역전의 경우에는 양진폭 변형률을 포함한 잔류변형률로서 측정하였다. 초기전단응력에 따라 축변형률의 발달 양상이 확연히 달라지는 것을 관찰할 수 있다.

그 특징을 구분짓는 요소는 응력역전 유무라 할 수 있다. $t_s=0$과 $t_s=10$인 경우인 응력 역전의 경우, 축변형률은 초기에 거의 일어나지 않다가 유동변형이 발생하면서 급격히 증가하여 파괴하는 양상을 보였다. 이 현상은 응력 역전의 경우에는 유동변형 후 급격히 인장 측의 파괴포락선에 닿아 파괴에 도달함을 추측할 수 있다.

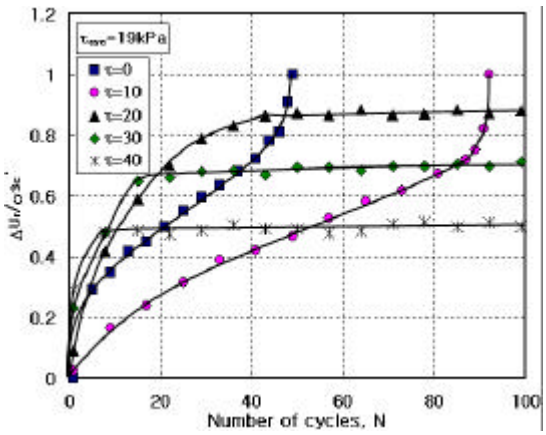
다음으로 $t_s=20, t_s=30, t_s=40$ 경우인 응력 비역전의 경우에는 유동변형 발생 후 점진적으로 변형률이 증가하여 2%에서 10%까지 변형률에 도달하는 사이에 상당한 반복횟수의 차이를 나타내고 있다. 1994년 *Hyodo et al.*의 실험 결과와 1983년 *Vaid & Chern*의 실험결과에서도 유동변형이 발생하였는데 그들의 실험에서는 유동변형이 거의 같은 반복횟수에서 순간적으로 일어난 후 변형률이 발달 지연 현상이 관찰되었다.

반면에 본 연구에서는 상대적으로 완만한 곡선을 이루며 유동 변형이 발생한 후 마찬가지로 변형률 발달 지연 현상이 나타났다. 그 이유는 입자의 모난 정도, 시료성형법, 시험장치의 차이 등에서 기인하는 것으로 생각된다. 또한 $t_s=30$, $t_s=40$ 에서는 압축 측의 CSR선에 가깝기 때문에 유동 변형이 반복횟수 초기에 발생한 것으로 추정되었다.

<Fig. 4-4>는 <Fig. 4-3>과 같은 시험조건에서 반복횟수에 따른 잔류간극수압을 나타낸 그래프이다. 모든 시험에서 잔류간극수압은 반복하중에 따라 점진적으로 증가했다. 그런 다음 최종 값에 도달하기 전에 간극수압은 갑작스럽게 증가하였다. 또한 잔류간극수압의 날카로운 증가는 모든 경우에서 축변형률에 갑작스런 발달을 동반하였다. 이 현상은 시료에서 발달하는 수축적인 유동 변형과 관련이 깊다.



<Fig. 4-3> 반복횟수와 축변형률의 관계



<Fig. 4-4> 반복횟수와 과잉간극수압비의 관계

응력 역전의 경우, 잔류간극수압의 최종 값이 초기유효구속압, s_{3c}'에 도달하여 초기 액상화 현상이 발생하였지만 응력 비역전의 경우에는 잔류간극수압의 최종 값은 s_{3c}' 보다 작았다. 그리고 잔류간극수압의 최종 값은 초기전단응력이 증가함에 따라 감소하는 경향을 보였다. 특이할 만한 점은 $t_s = 10$ 인 이방압밀 상태에서도 응력 역전이 있는 경우에는 초기액상화가 일어났다는 점이다. 정상상태 강도가 거의 0인 인장 측의 파괴 포락선에 도달하는 시료는 비록 이방압밀 상태일지라도 초기 액상화가 발생하였다.

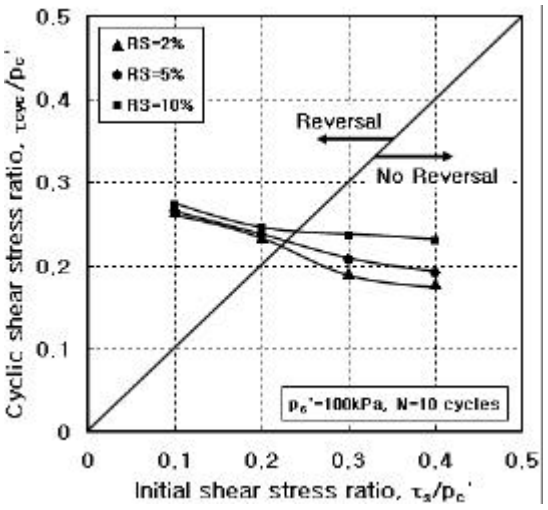
4.3 초기전단응력에 따른 액상화 저항강도

초기전단응력에 따른 액상화 저항강도는 특정한 반복횟수에서 양진폭변형률 또는 잔류변형률의 특정한 양까지 발달하는 데 요구되는 반복전단응력비, t_{cyc} / p_c'로 표현 할 수 있다.

앞서서 살펴보았듯이 초기전단응력에 따른 액상화 저항강도비는 반복전단응력의 역전 유무에 따라 값이 변한다. 응력 역전이 있는 경우에는 초기전단응력이 0일 때는 잔류 변형률은 0이다. 초기전단응력이 증가함에 따라 응력 역전 정도가 작아지면서 양진폭 변형률과 잔류 변형률의 크기는 비슷해진다. 본 연구에서는 이렇게 두 가지 변형률의 크기가 비슷해지는 지점이 $t_s = 20$ 일 때 나타났다. 초기전단응력이 더욱 증가하게 되면 응력은 비역전 상태가 되는데 이 때는 양진폭 변형률은 아주 작은 량으로 반복을 거듭하는 반면 잔류 변형률이 발달하여 파괴에 이르게 된다.

본 연구에서 사용한 느슨한 한강 모래를 가지고 한 실험에서는 $t_s = 0$에서 $t_s = 20$ 까지는 양진폭변형률이 잔류변형률 보다 발달하였고 $t_s = 30$에서 $t_s = 40$ 까지는 잔류변형률이 양진폭변형률보다 발달하였다.

이와 같이 응력 역전의 경우는 같은 반복횟수에서 양진폭 변형률이 먼저 발달하였고 응력 비역전의 경우에는 잔류변형률이 먼저 발달하였음을 알 수 있다. 따라서 특정한 반복횟수에서 최대 축변형률은 응력 역전의 경우에 양진폭 변형률이고 응력 비역전의 경우 반복변형률을 포함한 잔류변형률이다. 하지만 응력 비역전의 경우에는 반복변형률은 미소하기 때문에 반복변형률을 포함한 잔류변형률과 잔류변형률과의 차이는 거의 없다.



<Fig. 4-5> 반복횟수 10회에서 = 2, 5, 10%를 일으키는 데 필요한 액상화 저항강도비와 초기전단응력비와의 관계

<Fig. 4-5>는 반복횟수 10회에서 각각 축변형률 2, 5, 10%를 일으키는 데 필요한 액상화 저항강도비, t_{cyc}/p_c'와 초기전단응력비, t_s/p_c'와의 관계를 나타낸 그래프이다. 그림에서와 같이 액상화 저항강도비는 초기전단응력에 따라 다르며 액상화 저항강도의 정의에 따라 달라짐을 알 수 있다. 전체적으로 보았을 때 초기전단응력에 따라 액상화 저항강도비는 증가하다 감소하는 경향을 띠었으며 액상화 강도의 정의에 따라서는 응력 비역전의 경우 축변형률 2%와 5%의 강도가 현저히 감소하는 결과를 나타내었다.

따라서 액상화 저항 강도는 초기 액상화 현상이나 간극 수압이 수렴하는 반복횟수에 의하여 정의하는 것보다는 관심이 되는 특정 축변형률에 따라 정의되어야 하며 특히 지진이나 진동하중에 의해 발생하는 작은 변형에도 위험한 정밀 구조물의 설계에는 초기전단응력을 고려하여 액상화 저항 강도를 평가함이 바람직한 것으로 보인다.

5. 결 론

본 논문에서는 현장의 응력 상태를 고려하여 초기전단응력이 액상화 저항 및 반복하중거동특성에 미치는 영향을 규명하기 위하여, 한강 하류에서 채취한 충적 사질토에 대하여 초기상대밀도 약 35%의 느슨한 시료를 이방 압밀시켜 초기전단응력을 달리한 조건에서 비배수 응력 제어 반복삼축시험과 변형률 제어 정적삼축시험을 실시하여 다음과 같은 결론에 도달하였다.

먼저, 정적시험에서 파괴포락선, 상전이선, 한계유효응력비는 초기전단응력에 독립적으로 일정하였고 파괴포락선과 한계유효응력비선의 기울기의 절대치는 인장측이 더 낮은 기울기 값을 나타내었다.

둘째로 반복시험에서 응력 역전조건인 경우에 축변형률은 유동 변형이 발생한 후 급격히 증가하여 파괴에 이르렀다. 응력 비역전조건 일 때 축변형률은 유동 변형이 발생한 후 점진적으로 증가하여 파괴에 도달하였다. 파괴는 응력 역전인 경우 반복변형률에 의해서 좌우되었으며 응력 비역전인 경우에는 잔류변형률에 의하여 지배되었다.

셋째로 반복시험동안에 간극수압은 응력 역전에 상관없이 반복하중에 따라 점진적으로 증가하였으며 유동 변형이 일어남과 동시에 거의 최대 값에 가깝게 증가하였다. 응력 역전의 경우 초기액상화가 발생하였으며 응력 비역전의 경우 초기액상화현상은 일어나지 않았으며 최종잔류간극수압은 초기전단응력에 따라 감소하는 경향을 보였다.

넷째로 반복시험동안의 유효응력경로는 응력 비역전의 경우 압축 측의 CSR선에 도달한 후 파괴선을 향하여 급진적으로 이동하였으며 이후 응력 경로는 안정화하여 파

괴선 가까이에서 폐곡선을 그렸다. 응력 역전의 경우에는 인장 측의 CSR선에 도달 한 후 급격히 인장 측의 파괴선에 도달하여 유효응력 0인 지점에 도달하였다. 응력 역전의 경우 인장 측의 파괴포락선에 지배를 받는 이유는 파괴 포락선 기울기의 절대치가 압축보다 인장 측에서 더 작은 값을 나타내기 때문으로 추정된다.

마지막으로 초기전단응력에 따른 액상화 저항 강도는 전체적으로 보아 증가하다가 감소하는 경향을 띠었으며 특히, 응력 비역전의 경우에는 액상화 강도의 기준이 되는 변형률이 감소함에 따라 액상화 저항강도도 현저히 감소하였다. 따라서 액상화 저항 강도는 초기 액상화 현상이나 간극 수압이 수렴하는 반복횟수에 의하여 정의하는 것보다는 관심이 되는 특정 축변형률에 따라 정의되어야 하며 특히 지진이나 진동하중에 의해 발생하는 작은 변형에도 위험한 정밀 구조물의 설계에는 초기전단응력을 고려하여 액상화 저항 강도를 평가함이 바람직한 것으로 보인다.

<참 고 문 헌>

1. 김태훈, 실트질 모래 지반의 액상화 특성(2000), 공학석사학위논문, 서울시립대학교.
2. 건설교통부(1997), 내진설계기준연구(II).
3. 이민호, 액상화에 의한 실트질 모래지반의 침하산정(2001), 공학석사논문, 서울시립대학교.
4. 이송, 전제성, 김태훈, 반복삼축시험에 의한 실트질 모래 지반의 액상화 특성 연구(1999), 한국지반공학회논문집, 제15권, 제4호, pp.133-152.
5. 이송, 김태훈, 이민호, 실트 모래지반의 Flow Line을 이용한 액상화 분석(2000), 대한토목학회논문집, 제20권, 제2호, pp.155-165.
6. 이송, 윤광현, 김태훈, 김종수, 초기전단응력이 사질토의 액상화 저항에 미치는 영향(2002), 대한토목학회 2002년 학술발표회, pp.349-352.
7. Hanzawa, H. et al., Shear Characteristics of a Quick Sand in the Arabian Gulf(1979), Soils and Foundations, Japanese Geotechnical Society, Vol.19, No.4, pp.1-15.
8. Hyodo, M. et al., Undrained Cyclic and Monotonic Triaxial Behaviour of Saturated Loose Sand(1994), Soils and Foundations, Japanese Geotechnical Society, Vol.34, No.1, pp.19-32.
9. Kramer, S. L., Geotechnical Earthquake Engineering(1996), Prentice-Hall, Inc., pp.348-422.
10. Ladd, R. S., Preparing Test Specimens Using Undercompaction (1978), Geo-technical Testing Journal, GTJODJ, Vol.1, No.1, pp.16-2.
11. Selig, E. T., and Chang, C. S., Soil Failure Modes in Undrained Cyclic Loading(1981), Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE, Vol.107, No.5, pp.539-551.
12. Vaid, Y. P., and Chern, J. C., Effect of Static Shear on Resistance to Liquefaction(1983), Soils and Foundations, Japanese Geotechnical Society, Vol.23, No.1, pp.47-60.